

# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## 1. Электромагнитная природа света

### Основные понятия

В 1865 г. Максвелл создал теорию электромагнитного поля, предсказав существование электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве со скоростью света. Это дало основание считать свет одним из видов электромагнитного излучения.

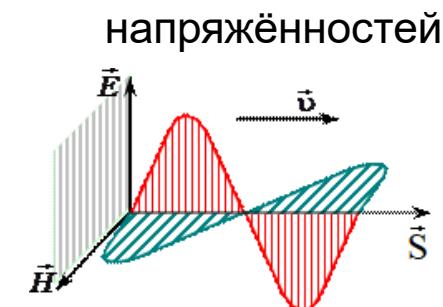
В электромагнитной световой волне колеблются векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  электрического и магнитного полей соответственно.

При этом  $\vec{E}$  перпендикулярен  $\vec{H}$  и  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  перпендикулярны направлению распространения волны  $\vec{S}$ , т.е. световые волны поперечны. Действие света на глаз называется колебания электрического вектора, называемого в оптике световым.

Уравнения светового вектора плоской электромагнитной волны записывается:

$$\vec{E} = \vec{E}_m \cos(\omega t - kr + \alpha), \quad (1.1)$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны света;  $\omega$  – циклическая частота колебаний вектора  $\vec{E}$ ;  $t$  – момент времени наблюдения;  $r$  – расстояние от источника волны до точки наблюдения;  $\vec{E}_m$  – амплитуда светового вектора;  $\alpha$  - начальная фаза источника колебаний (источника света).



## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 1. Электромагнитная природа света

Скорость света в вакууме обозначается  $C$ , в среде -  $V$ . Согласно Максвеллу

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon\mu}}. \quad (1.2)$$

Абсолютным показателем преломления среды называется величина, равная отношению

$$n = \frac{C}{V} \quad (1.3) \quad \text{или} \quad n = \sqrt{\epsilon\mu}, \quad (1.4)$$

где  $\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость среды.

В соотношении (1.4) отражена связь между оптическими, электрическими и магнитными свойствами среды. Показатель преломления  $n$  характеризует оптическую плотность среды и зависит от длины волны света.

Частота колебаний источника света не зависит от среды, в которой распространяется световая волна. Поэтому при переходе световой волны из одной оптической среды в другую частота (или период) колебаний векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  остается неизменной, но изменяется длина волны.

# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

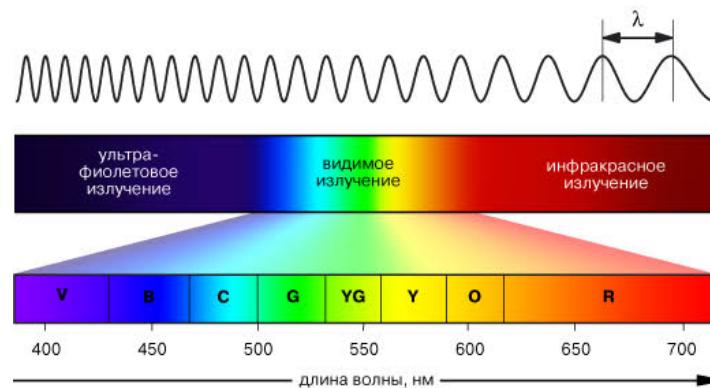
## 1. Электромагнитная природа света

Если обозначить длину волны света в вакууме  $\lambda_0$ , в среде -  $\lambda$ , то скорость света в вакууме и среде запишется соответственно:

$$c = \frac{\lambda_0}{T} \text{ и } v = \frac{\lambda}{T},$$

откуда следует отношение  $\frac{c}{v} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$  или  $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ . (1.5)

Длина волн видимого света заключены в пределах:  $\lambda_0 = (0,40 \div 0,76)$  мкм. (1.6)



# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## 1. Электромагнитная природа света

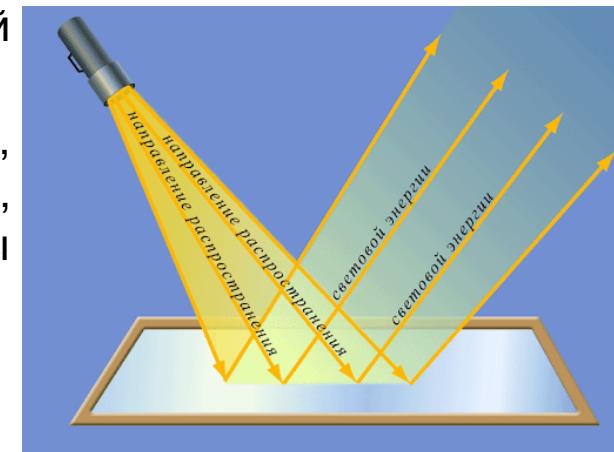
Световая волна переносит энергию. Линия, вдоль которой переносится световая энергия, называется лучом.

Точечным источником света называется такой источник, линейные размеры которого значительно меньше расстояний, рассматриваемых в данной задачи, в частности, длина волны изучаемого им света.

Световым потоком через некоторую поверхность  $S$  называется количество световой энергии, переносимое через эту поверхность в единицу времени

$$\Phi = \frac{dW}{dt}. \quad (1.7)$$

Плотность потока энергии световой волны называется вектор  $\vec{S} = [\vec{E} \ \vec{H}]$ , направленный в сторону распространения волны и численно равный потоку энергии через единичную площадку, помещенную в данной точке перпендикулярно направлению распространения энергии (лучу).



## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 2. Интерференция световых волн

Всякий реальный источник света представляет собой совокупность огромного количества возбуждаемых атомов, излучающих независимо друг от друга электромагнитные (световые) волны. Каждый атом излучает, примерно  $10^{-8}$  с группу электромагнитных волн (цуг волн) протяженностью около трех метров с некоторой начальной фазой.

Время, за которое случайное изменение фазы волны достигает  $\pi$ , называется *временем когерентности*  $\tau_{\text{ког}}$  оно характеризует когерентные свойства волн. Волны, принадлежащие разным цугам, некогерентны.

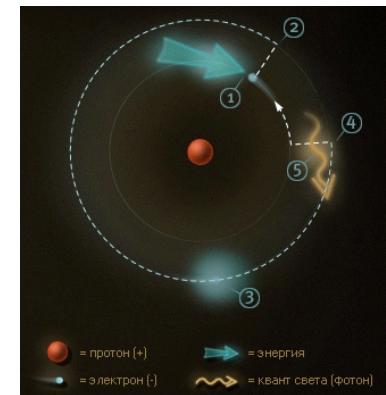
За время когерентности волна в однородной среде проходит путь  $l_{\text{ког}} = c \cdot \tau_{\text{ког}}$ , называемый *длиной когерентности*.

Световую волну (1.1) можно записать в виде:

$$E = A \cos(\omega t - k \cdot r + \alpha), \quad (2.1)$$

где  $E$  – модуль светового вектора в момент времени  $t$ ;

$A$  – его амплитудное значение ( $A = E_m$  в (1.1)).



## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 2. Интерференция световых волн

Волны, у которых  $A$ ,  $\omega$ ,  $\alpha$  постоянны во времени и пространстве, называются **монохроматическими**.

Чем ближе волна к монохроматической, тем больше время и длина когерентности. Когерентность волн, определяемая степенью их монохроматичности, называется **временной когерентностью**.

Размеры источника также влияют на когерентность излучаемых волн

*Радиусом когерентности* (или *длиной пространственной когерентности*) называется расстояние между точками источника, между которыми случайное изменение разности фаз достигает  $\pi$ , т.е. радиус когерентности определяет максимальный угловой размер источника, излучающего когерентные волны, и, таким образом, характеризует пространственную когерентность.

Монохроматические волны одной частоты, достигнув некоторой точки пространства, возбуждает в ней гармонические колебания такой же частоты и с постоянной разностью фаз за время, достаточное для наблюдений.

*Монохроматический свет* – одноцветный свет

каждому цвету соответствует своя длина и частота волны

760 – 620 – нм	620 – 590 – нм	590 – 560 – нм	560 – 500 – нм	500 – 480 – нм	480 – 450 – нм	450 – 380 – нм
----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------

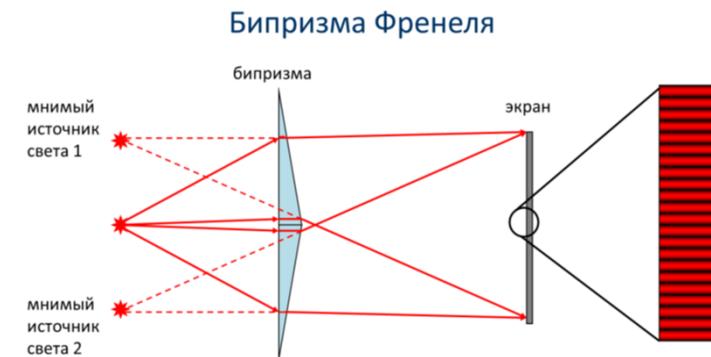
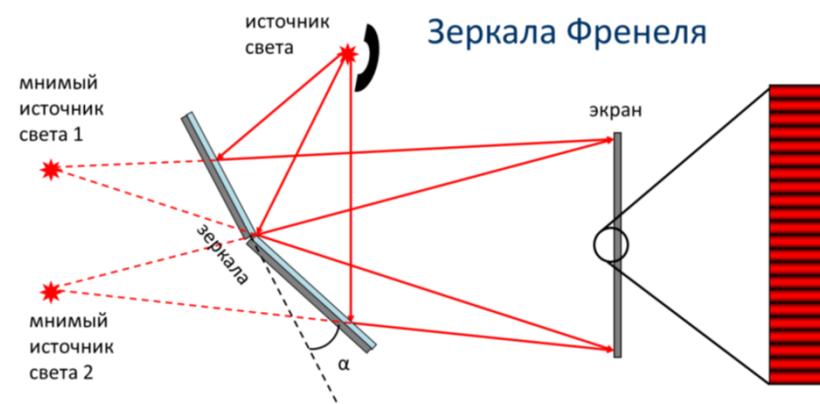
## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 2. Интерференция световых волн

Складывающиеся гармонические колебания одной частоты (периода) с постоянной разностью фаз называются *когерентными колебаниями*. Волны, возбудившие когерентные колебания, также называются когерентными. Стого монохроматические волны одной частоты всегда когерентны.

От двух независимых источников света невозможно получить когерентные волны. Однако посредством отражений и преломлений один цуг можно расчленить на два потока, которые могут снова объединиться после прохождения различных путей. Такие волны когерентны, так как принадлежат одному цугу.

Практически это можно сделать с помощью экранов и щелей, зеркал и преломляющих тел. Самыми распространенными устройствами являются щели Юнга, зеркала Френеля, бипризма Френеля.



# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

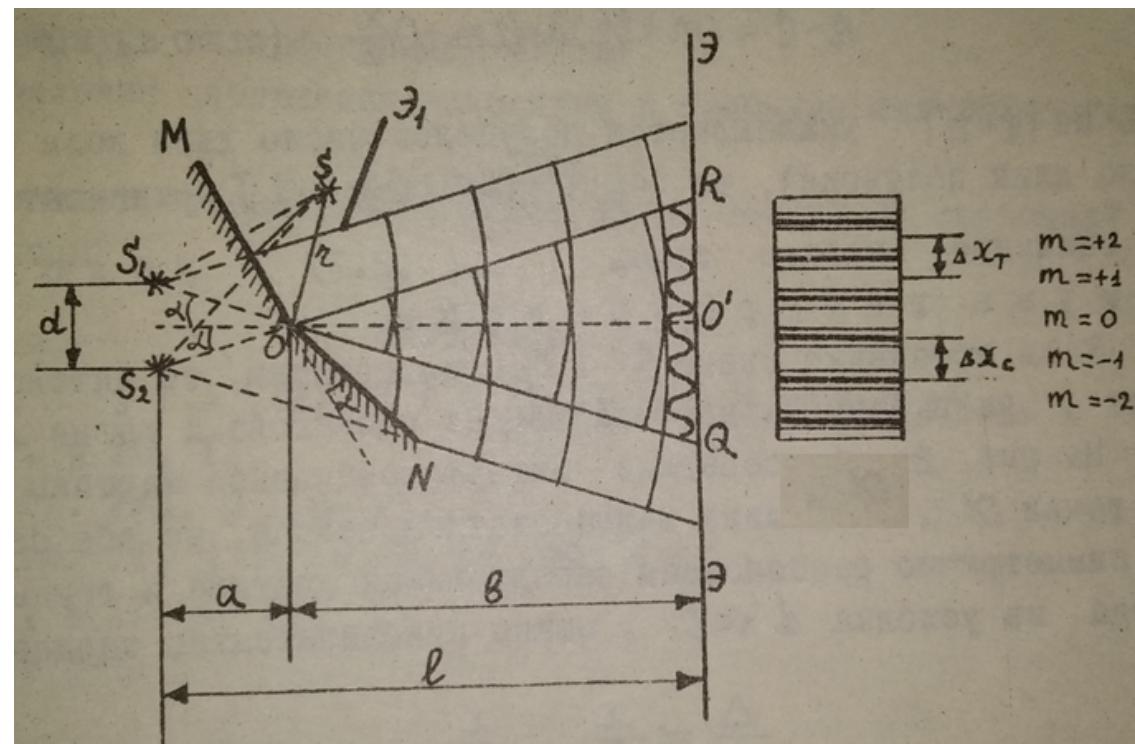
## 2. Интерференция световых волн

У всех способов общее то, что получается два изображения излучающего центра, испускающие когерентные волны.

На рисунке изображены бизеркала Френеля. В плоских зеркалах  $M$  и  $N$ , составляющий небольшой угол  $\alpha$ , получают мнимые изображения  $S_1$  и  $S_2$  источника света  $S$  (узкая светящая щель).

$S_1$  и  $S_2$  – когерентные источники света, испускают когерентные волны, перекрывающиеся на экране  $\mathcal{E}$  в область  $RQ$ . Экран  $\mathcal{E}_1$ , препятствует световому потоку от источника света  $S$  попадать непосредственно на экран  $\mathcal{E}$ .

Расстояние  $d$  между  $S_1$  и  $S_2$  значительно меньше расстояния  $l$  между экраном  $\mathcal{E}$  и плоскостью  $S_1S_2$ .

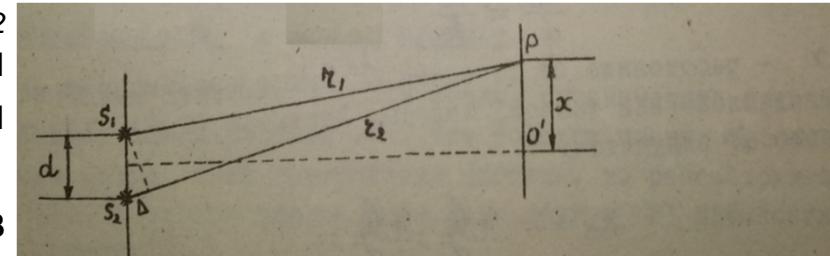


## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 2. Интерференция световых волн

Когерентные волны, испускаемые источниками  $S_1$  и  $S_2$  (смотрим рисунок) проходят различные пути  $r_1$  и  $r_2$  до точки наблюдения  $P$ , лежащей на экране  $\mathcal{E}$  в области перекрытия волн  $RQ$ .

В общем случае пути  $r_1$  и  $r_2$  могут пролегать в различных оптических средах.



Оптической длиной пути световой волны называется величина, равная произведению геометрического пути  $r$  волны на показатель преломления  $n$  среды, в которой распространяется волна.

Оптической разностью хода  $\Delta$  лучей называется разность  $r_2 n_2 - r_1 n_1$  оптических путей двух волн, распространяющихся в средах с показателями преломления  $n_2$  и  $n_1$  соответственно.

$$\Delta = r_2 n_2 - r_1 n_1 \quad (2.2)$$

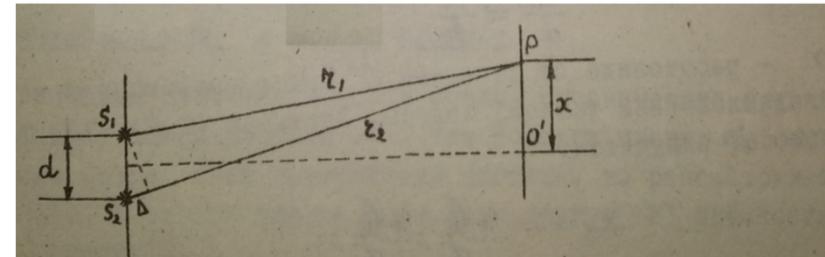
Если обе волны распространяются в воздухе, то приближенно  $n_1=n_2=n$  (для воздуха  $n=1$ ) и оптическая разность хода  $\Delta$  становится равной разности геометрических путей  $r_1$  и  $r_2$  волн.

$$\Delta_{воздух} = r_2 - r_1 \quad (2.3)$$

## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 2. Интерференция световых волн

Каждая волна в точку Р вызывает колебание независимо от действия других. Колебания, возбужденные всеми волнами, дошедшими до точки наблюдения, складываясь дают результирующее колебание.



В этом заключается *принцип суперпозиции (наложения) волн*: результат нескольких одновременных воздействий представляет собой сумму результатов, вызванных каждым воздействием в отдельности.

При наложении когерентных волн колебания одного направления, в зависимости от разности фаз волн, в одних точках пространства усиливают, а в других – ослабляют друг друга. При этом средняя энергия результирующего колебания не равна сумме средних энергий слагаемых колебаний и может быть больше или меньше ее, в зависимости от разности фаз. Это явление называется *интерференции*.

*Интерференцией света называется явление наложения когерентных волн, при котором происходит перераспределение светового потока в пространстве с образованием максимумов и минимумов интенсивности.*

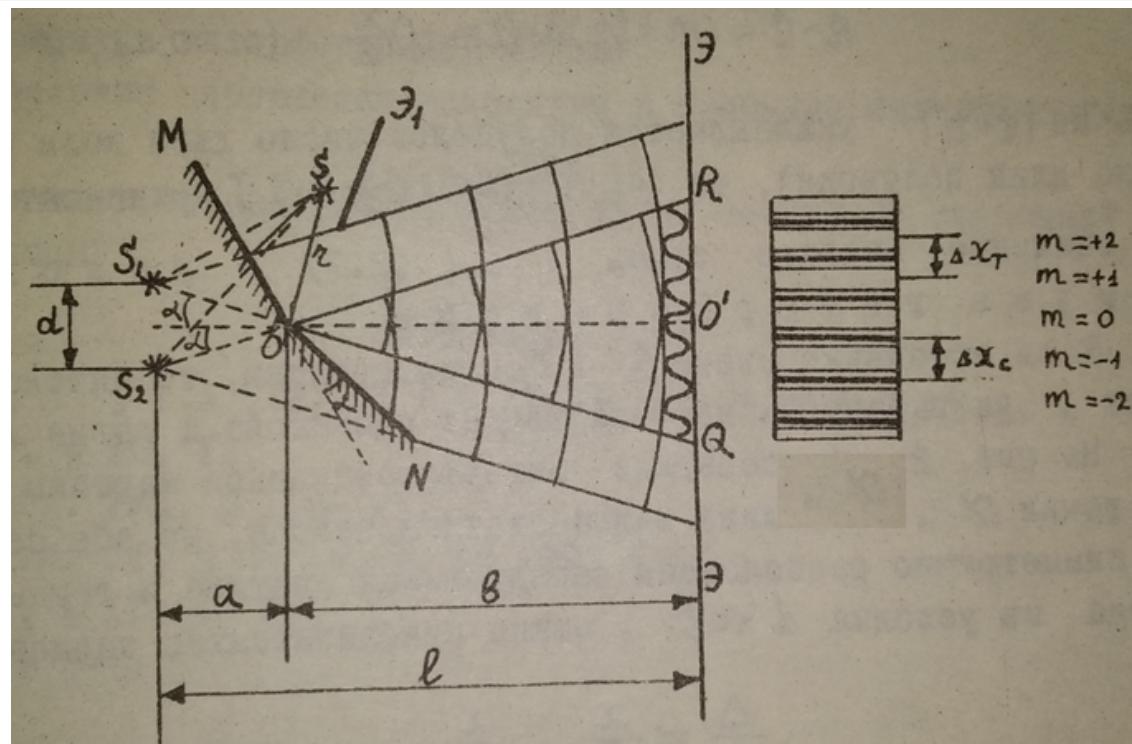
# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## 2. Интерференция световых волн

Область, в которой когерентные волны перекрываются, называется полем интерференции (см. рис. – область  $RO'Q$ ).

В поле интерференции наблюдается чередование мест с максимальной и минимальной интенсивностью света (максимум и минимум интерференции).

Если в поле интерференции внести экран Э, то на нем наблюдается интерференционная картина — чередующиеся светлые и темные полосы.



## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 2. Интерференция световых волн

Если волны, исходящие из  $S_1$  и  $S_2$ , вызывают в точке  $P$  колебания одного направления с амплитудами  $A_1$  и  $A_2$ , то амплитуда  $A$  результирующего колебания определяется:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos k(r_2 - r_1) \quad (2.4)$$

Интенсивность  $I$  света пропорциональна квадрату амплитуды  $A^2$ . Поэтому

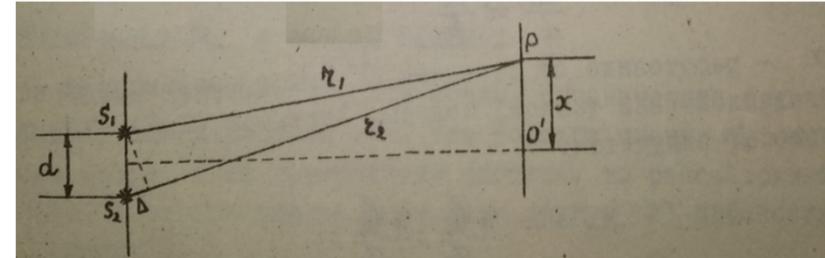
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1}\sqrt{I_2} \cos k(r_2 - r_1) \quad (2.5)$$

Результирующая интенсивность  $I$  зависит от величины и знака  $\cos k(r_2 - r_1)$ , которое определяется разностью хода  $r_2 - r_1$ . Если

$$r_2 - r_1 = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.6)$$

т.е. на  $|r_2 - r_1|$  укладывается целое число длин волн (четное число длин полуволн) то  $\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}m\lambda\right) = 1$  и интенсивность  $I$  принимает максимальное значение, больше суммы  $I_1 + I_2$ .

(2.6) – условие максимума интерференции.



## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 2. Интерференция световых волн

Если  $r_2 - r_1 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) (2.7)

т.е. на  $|r_2 - r_1|$  укладывается полуцелое число длин волн (нечетное число длин полуволн), то  $\cos \frac{2\pi}{\lambda} (2m+1)\frac{\lambda}{2} = -1$ ,  $I$  принимает минимальное значение, меньше суммы  $I_1 + I_2$ .

(2.7) – условие минимума интерференции.

Если источники света  $S_1$  и  $S_2$  некогерентны, то интенсивность света  $I$  на экране Э во всех точках одинакова и равна  $I_1 + I_2$ .

## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 2. Интерференция световых волн

На рисунке в середине интерференционной картины ( $m = 0$ ), против точки  $O'$ , отчетливо видна светлая полоса, по обе стороны которой симметрично расположены чередующие светлые и темные полосы.

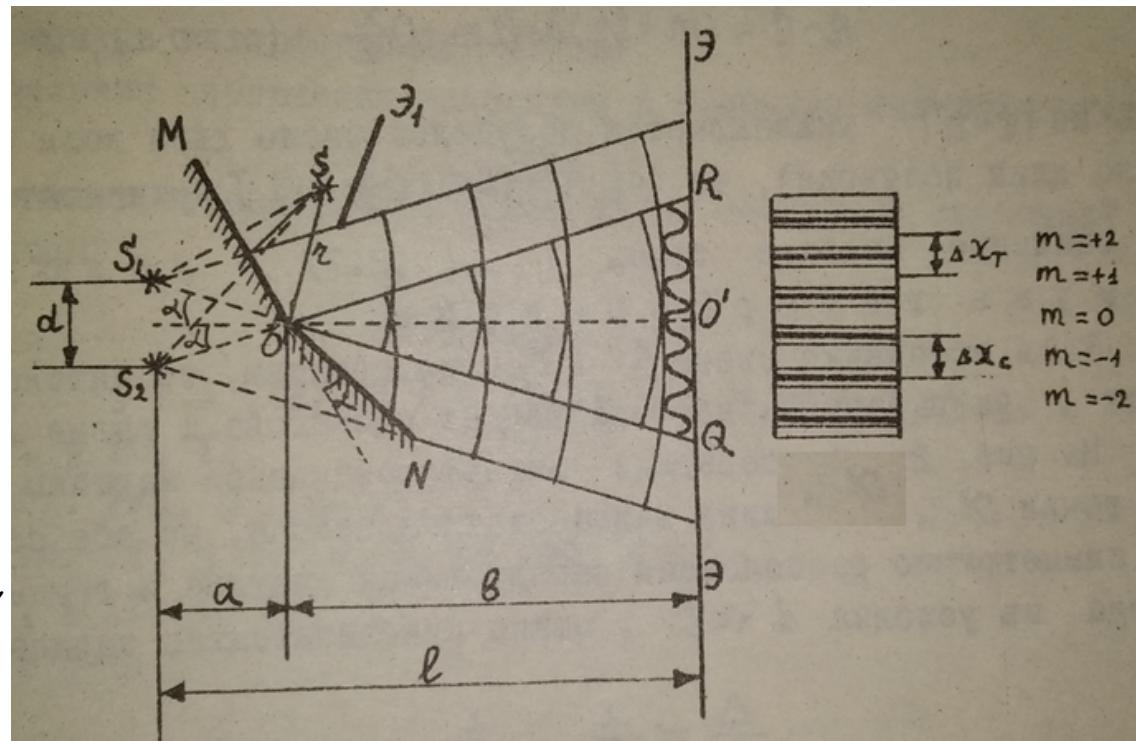
Исходя из условии  $d \ll l$ , можно приблизительно записать:

$$\frac{\Delta}{d} = \frac{x}{l} \quad (2.8)$$

где  $x$  – расстояние от середины  $O'$  интерференционной картины до  $m$ -й светлой (или темной) полосы.

Учитывая (2.6) для  $m$ -й светлой полосы, получается

$$x_c = m\lambda \frac{l}{d}, \quad (2.9)$$



## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## 2. Интерференция световых волн

Учитывая (2.7) для  $m$ -й темной полос

$$x_T = (2m+1) \frac{\lambda}{2} \frac{l}{d} \quad (2.10)$$

Расстояние между двумя соседними светлыми полосами представляет собой ширину темной полосы, так что

$$\Delta x_T = \lambda \frac{l}{d} \quad (2.11)$$

Можно показать, что расстояние между двумя соседними темными полосами равно ширине светлой полосы  $\Delta x_C$  и выражается такой же формулой.

## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 3. Интерференция в тонких пленках

Тонкой пленкой называется часть среды, ограниченная двумя близко расположеными поверхностями так, что толщина пленки  $d$  сравнима с длиной волны.

Если поверхности плоские, то рассматривают два случая: 1) плоскости параллельны друг друга; 2) плоскости не параллельны (клины).

В отраженном и проходящем свете вблизи пленки наблюдается интерференционная картина:

мыльные пленки



нефть на воде



поверхность CD, DVD



Местонахождения интерференционной картины зависит от толщины, геометрической формы пленок и от условий освещения.

# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 3. Интерференция в тонких пленках

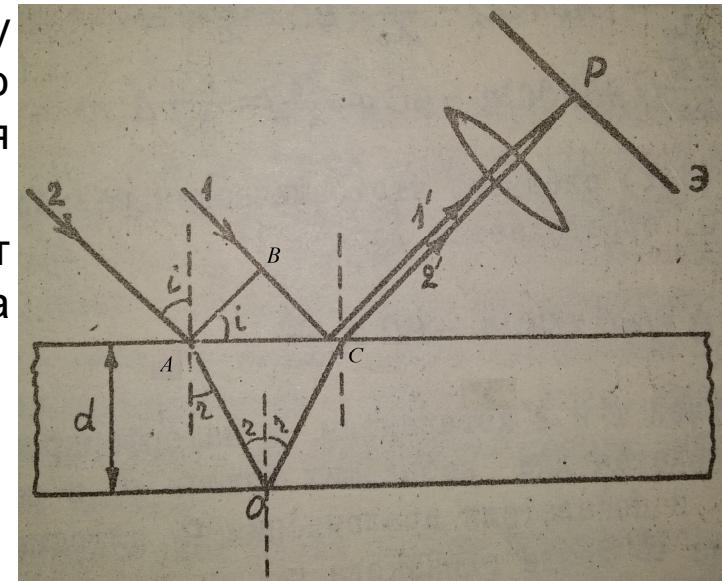
Пусть на тонкую прозрачную, однородную пластинку толщины  $d$  с показателем преломления среды  $n > 1$ , окруженную воздухом ( $n_{\text{в}} = 1$ ) падает параллельный пучок света (плоская световая волна).

Выделим в падающем пучке лучи 1 и 2, которые испытывают на верхней и нижней поверхностях отражение и преломления, а в точке С сходятся, пройдя различные оптические пути.

Волны, распространяющиеся вдоль этих лучей, возбуждают за точкой С колебания с некоторой постоянной разностью фаз  $\delta$ , обусловленной оптической разностью хода  $\Delta$  лучей 1 и 2 в точке С.

В точках  $A$  и  $B$  фронта падающей волны колебания совершаются в одинаковых фазах.

Колебания в точке  $C$ , вызванные волной, отраженной от верхней поверхности, отстают по фазе от колебаний в точке  $B$  на величину  $\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} BC \pm \pi$ , где  $\lambda_1$  – длина волны света в воздухе  $\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n_{воздух}} = \lambda_0$ , т.к.  $n_{воздух} = 1$ ;  $\lambda_0$  – длина волны света той же частоты в вакууме.



## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 3. Интерференция в тонких пленках

Учитывая, что  $n > n_{\text{воздух}}$ , то среда пластины оптически более плотная, чем воздух, и при отражении волны в точке С происходит изменение фазы на  $\pi$ , что равносильно изменению хода на  $\lambda_0/2$  и учитывается в  $\delta_1$  добавочным слагаемым  $\pi$ .

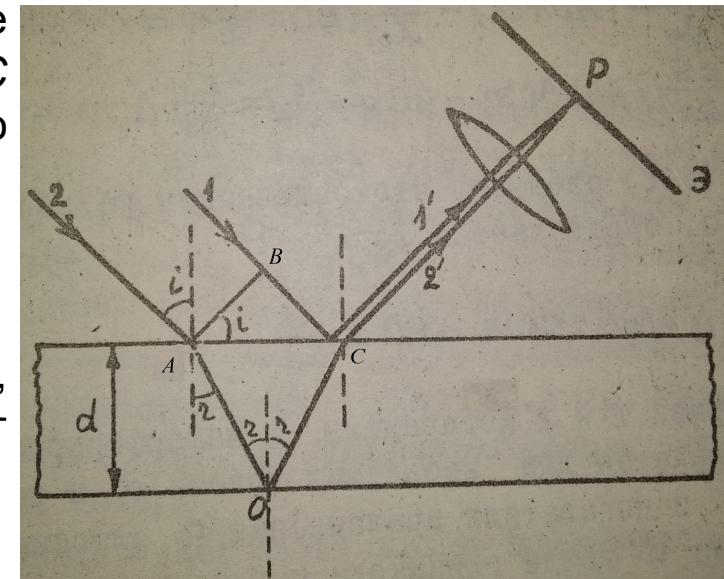
$$\text{Окончательно } \delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left( BC \pm \frac{\lambda_0}{2} \right).$$

Аналогично колебания в точке С, вызванные волной, отраженной от нижней поверхности, отстают по фазе от колебаний в точке А на величину  $\delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} (AO + OC)$ , где  $\lambda_2 = \frac{\lambda_0}{n}$  – длина волны света в пластинке.

$$\text{Поэтому } \delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} (AO + OC) n.$$

Разность фаз  $\delta$  колебаний в точке С и вдоль 1', 2' запишется:

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 = \frac{2\pi n}{\lambda_0} (AO + OC) - \frac{2\pi}{\lambda_0} \left( BC \pm \frac{\lambda_0}{2} \right) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[ (AO + OC)n - BC \pm \frac{\lambda_0}{2} \right] \Rightarrow$$



## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 3. Интерференция в тонких пленках

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta \quad (3.1)$$

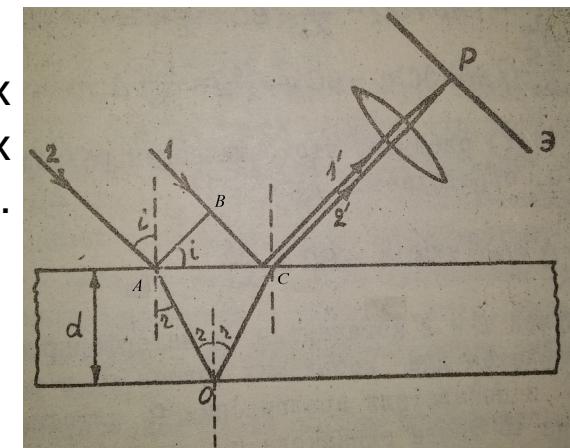
Из выражение (3.1) следует, что оптическая разность хода лучей 1' и 2' в точке С, определяется формулой:

$$\Delta = (AO + OC)n - BC \pm \frac{\lambda_0}{2} \quad (3.2)$$

Волны вдоль лучей 1' и 2' когерентны и интерферируют. Условия когерентности выполняется для небольших толщин  $d$  и зависит от угла падения лучей  $i$  и от показателя преломления  $n$  пластиинки.

Так как толщина  $d$  везде одинакова и угол падения  $i$  для всех лучей один, на экране, поставленном на пути интерферирующих лучей 1' и 2' будет наблюдаться равномерная освещенность. Величина освещённости зависит от угла падения  $i$ .

Если поставить на пути отражённых лучей 1' и 2' собирающую линзу, то на экране, помещенной в фокальной плоскости линзы, получится точка  $P$ .

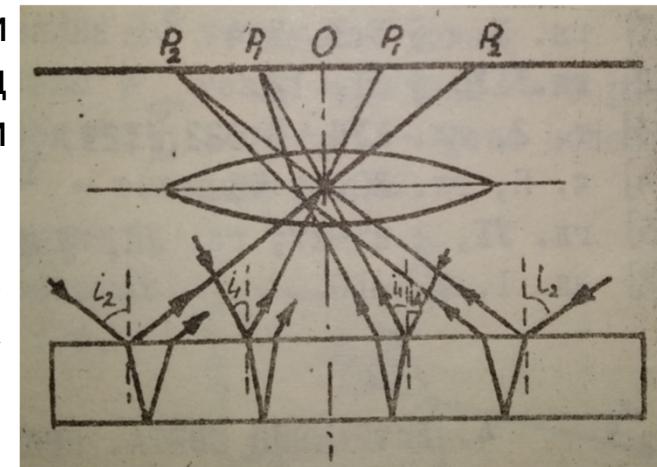


## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 3. Интерференция в тонких пленках

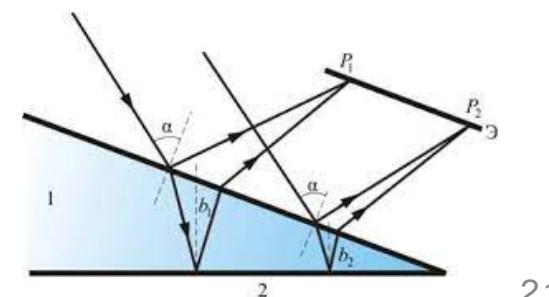
В случае освещения плоскопараллельной пластиинки рассеянным монохроматическим светом, лучи, отраженные под одним углом, образуют коническую поверхность, а на экране точки  $P$  сливаются в окружность с центром  $O$  напротив центра линзы.

Так как рассеянный свет, содержит лучи всевозможных направлений, то на экране возникает система концентрических окружностей с различной степени освещенности в зависимости от  $\Delta$  - светлых и темных колец (полос).



Каждая полоса обусловлена лучами с одинаковым углом падения (отражения). Поэтому такие полосы называются *полосами равного наклона*, которое в отсутствии линзы локализованы в бесконечность, т.к. интерферирующие лучи параллельны друг другу.

При рассмотрении интерференции на клине можно приближенно пользоваться формулой (3.2). В этом случае лучи  $1'$ ,  $2'$  отраженные от клина, пересекаются без помощи линзы; интерференционная картина представляет собой систему полос светлых и темных, параллельных ребру клина, и локализована вблизи клина.



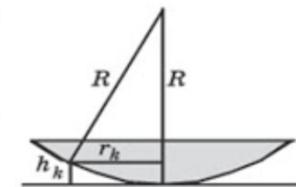
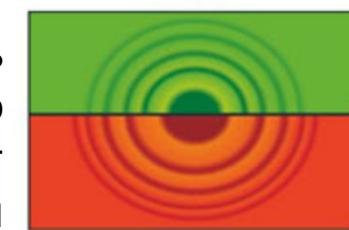
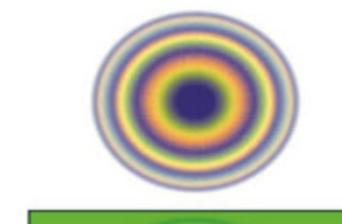
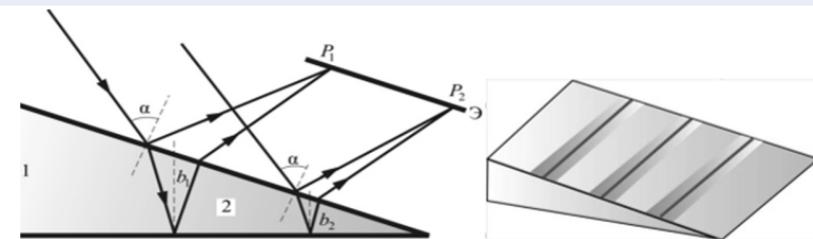
# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## 3. Интерференция в тонких пленках

Эти полосы называются *полосами равной толщины*, т.к. (3.2) выполняются для равных толщин одинаково.

Частным случаем линии равной толщины являются кольца Ньютона, которое можно наблюдать на установке, составленной из плоскопараллельной, обычно стеклянной пластиинки, с поставленной на нее выпуклой поверхностью плосковыпуклой линзы.

Пространство между линзой и пластиинкой может быть заполнена любой прозрачной средой, в частности воздухом. Это пространство и образует клин. Если на пластиинку (клину) падает белый свет, то интерференционная картина представляет собой радужные полосы.



## ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### 3. Интерференция в тонких пленках

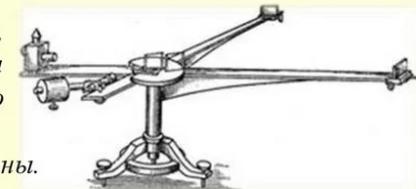
Явление интерференции света широко применяется для измерения длины волны света; для просветления оптики; для прецизионного (точного) измерения размеров; показателей преломления; плоско параллельности тонких пластинок; качества полированной поверхности; коэффициента расширения тел; температура газа; механического напряжения а также для выполнения различных анализов и др.

Приборы с помощью которых производятся эти измерения, называются интерферометрами.



#### Интерферометр Майкельсона

Применяя интерферометр, Майкельсон впервые провел сравнение международного эталона метра с длиной стандартной световой волны.



Общий вид интерферометра, как он изображен в докладе самого Майкельсона

С помощью интерферометров исследовалось также распространение света в движущихся телах, что привело к фундаментальным изменениям представлений о пространстве и времени.

Конструктивно состоит из светоотводительного зеркала, разделяющего входящий луч на два, которые отражаются зеркалом обратно. На полупрозрачном зеркале разделенные лучи вновь направляются в одну сторону, чтобы, слившись на экране, образовать интерференционную картину.

# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

## 3. Интерференция в тонких пленках